果园多风道喷雾机送风系统设计优化与试验

郭江鹏，王鹏飞*，李昕昊，杨 欣，李建平，边永亮，薛春林

（河北农业大学 机电工程学院，河北保定 071000）

摘 要：针对果园多风道喷雾机内部气流分布不均导致由出风口吹出的气流紊乱、影响使雾滴在果树冠层上均匀沉积的问题，对多风道喷雾机内部导流板长度参数进行了优化。应用计算流体动力学（Computational Fluid Dynamics，CFD）技术，基于Star-CCM+软件对喷雾机送风系统内部气流进行了模拟分析，得到出风口1～6的风速在不同导流板长度的标准差分别为0.7468、0.6776、1.4441、5.1305、4.5768和0.8209。对风速标准差较大的出风口3、出风口4、出风口5进行响应面分析，最终确定导流板1长度200.00 mm、导流板2长度60.00 mm、导流板3长度50.00 mm为最优参数组合。在最优组合参数下，计算得到对称出风口3和出风口6的风速值分别为39.135和41.320 m/s，相对偏差为5.58%；出风口4和出风口5的风速值分别为33.022和34.328 m/s，相对偏差为3.95%，符合设计要求。室内风速试验结果表明，在距离喷雾机出风口1.25 m处，风场风速由上层到下层逐渐增大，实现风场按果树冠层形状分布，喷雾机左右两侧风场对称分布，气流分布均匀。果园多风道喷雾机设计满足要求，可为同类设计提供参考。

关键词：计算流体力学；多风道喷雾机；送风系统；流场仿真；响应面法；均匀沉积

中图分类号：S491　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**SA202201015

引用格式：郭江鹏, 王鹏飞, 李昕昊, 杨欣, 李建平, 边永亮, 薛春林. 果园多风道喷雾机送风系统设计优化与试验[J]. 智慧农业(中英文), 2022, 4(3): 75-85.

GUO Jiangpeng, WANG Pengfei, LI Xinhao, YANG Xin, LI Jianping, BIAN Yongliang, XUE Chunlin. Design optimization and test of air supply system for multi-duct sprayer[J]. Smart Agriculture, 2022, 4(3): 75-85. (in Chinese with English abstract)

1 引 言

果园喷雾作业过程复杂，喷雾效果受很多因素的影响，如农药剂量和喷雾量、药液分布、风量、气流模式、喷雾机速度、气象条件以及农作物特性等[1-4]，需最大程度地提高生物学功效、最小化残留物，并与环境污染保持平衡[5,6]。果园喷雾涉及大量的喷雾器参数设置和环境参数，仅使用试验方法很难进行分析且成本昂贵[7-9]，将模拟与试验相结合进行探索是应对这些影响因素的有效方法。在研究过程中，计算流体力学（Computational Fluid Dynamics，CFD）技术得到了充分的应用，用以帮助解决复杂的过程。

研究人员已经将CFD技术广泛应用在风送喷雾机的设计研究上。Wang等[10]通过对轴流风机模拟数值分析得出当进口速度在25～55 m/s，扩散角在4.5°或5.5°时，压力损失最小，而随着

收稿日期：2021-10-25

基金项目：财政部和农业农村部国家现代农业产业技术体系项目（CARS-27）；河北省现代农业产业技术体系水果创新团队（HBCT2018100205）

作者简介：郭江鹏（1999—），男，硕士研究生，研究方向为果园机械装备。E-mail：499339707@qq.com

*通信作者：王鹏飞（1986—），男，讲师，硕士，研究方向为果园智能装备。E-mail：wpf5769@126.com

入口速度的增加，压力损失也逐渐增加。邱威等[11]设计了一款自走式果园定向风送喷雾机，通过理论设计和虚拟样机技术完成整机结构设计和各关键部件参数的确定，并通过田间试验验证性能。周良富等[12]设计了组合圆盘式果园风送喷雾机，并设计田间试验得到了最佳作业参数。陈帮[13]利用CFD技术，针对离心风机出风腔进行风场分析，结果显示在风机腔中加装带圆角的导流块，可以使风机风量提高0.27%～3.69%。丁天航等[14]针对单风机流道果园喷雾机气流场分布不均的问题，采用CFD数值模拟，对比分析了单双风道的气流场。Endalew等[15]建立了一种基于CFD的果园风送模型，该模型能够直接捕获果树冠层形状及其对自然风和喷雾气流的局部影响，从而得出更为真实的结果。Nuyttens等[16]通过CFD技术建立喷雾机三维雾滴飘失模型，结合果树冠层及环境因素对喷雾机风场进行模拟分析。Badules等[17]建立了一种CFD模型，用于研究喷雾器作业速度对横流式风送喷雾机外部三维气流的影响。Hong等[18]开发了一个集成的CFD模型用于预测由风送喷雾机吹出的气流在树木冠层内部和周围的速度分布，该模型通过滑动网格技术模拟喷雾器的运动，并且在计算域中将树木冠层定义为虚拟多孔介质，利用该模型分析有树枝的树木冠层内部气流速度分布。Zheng等[19]利用CFD技术对喷雾机外部风场进行模拟分析，在实验室条件下进行验证并测试。Holownicki等[20]开发了一个集成的CFD模型用来预测风送式喷雾器吹出的树冠内和周围气流的速度分布，采用滑移网格技术模拟喷头运动，将树冠模型定义为虚拟多孔介质，通过将CFD模拟结果与之前的测量结果进行比较，验证CFD模型。翟长远等[21]应用CFD流体仿真技术，对塔式喷雾机出风口风场进行建模与试验，研究了湍流模型和计算域尺寸对风场分布结果的影响特性。

以上研究针对不同类型喷雾机进行的CFD风场研究发现，模型构建的不同直接影响着风场的分布，而多风道风送式喷雾机的内部导流结构布置不合理会直接导致出风口风速分布不均匀的现象。为对果园多风道喷雾机内部风道进行优化设计，得到内部导流板最佳参数组合，本研究应用CFD技术，基于Star-CCM+软件对果园多风道喷雾机送风系统内部气流进行模拟分析，采用数值模拟分析的方法研究送风系统内部气流场分布规律，对各个参数下的简化模型进行数值模拟分析，后期观察送风系统内部流场和出风口风速，最终确定风道内部导流板长度，实现喷雾机两侧风道出风对称分布。

2 喷雾机关键部件设计

2.1 风道设计

多风道出口装置是连接涡轮式离心风机的关键零部件，将离心风机产生的气流分配到各风道出口。传统的风送式果园喷雾机多由轴流风机或离心风机产生喷雾所需气流，通过导风装置（如导流板）改变气流场的分布。此类导风装置的出口面积较大，从而导致气流场的分布主要呈半圆形扩散，部分由风机产生的气流不能有效到达靶标区域，造成气流损失，进而导致出风口处的气流风速降低。本研究设计了多风道出口装置，由多个相同截面的内部风道组成，保证气流能够精准有效地流向靶标所在的方向。根据前期对果树冠层的测量数据，对风道分布进行计算。将果树冠层近似看作圆锥形状，对冠层进行分层处理，上中下层冠层半径分别为0.40、0.80和1.10 m，依据公式（1）对上中下冠层体积进行计算。

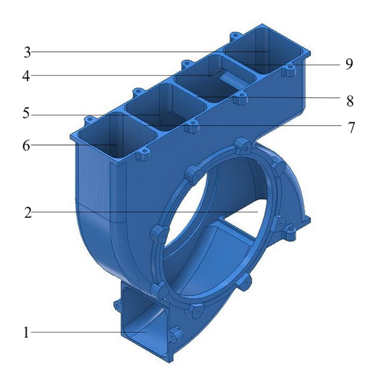
$$V=\frac{1}{3}\pi h\left(R^2+r^2+R\cdot r\right) \tag{1}$$

其中，V表示冠层体积，m^3；h表示上中下层之间的高度差，m，取h=1.00 m（树高在3.50 m左右，距地面0.50 m处为果树侧枝生长初始点，因此剩余3.00 m上、中、下层之间的平均高度h取1.0 m）；R表示下底半径，m；r表示上底半径，m。

经计算得到果树下、中、上层的冠层体积分

别为2.8、1.1和0.3 m³，在设计出风口时，下层两个出风口需占到整个圆弧面的1/2，中层和上层出风口由圆弧面向上延伸，进行4等均分，由内部三个导流板控制风量，根据第3节送风系统内部气流场模拟分析确定由左到右的三块导流板的长度分别为200.00、60.00和50.00 mm，如图1所示。设计内部风道时，为避免气流在较大转弯处产生湍流现象，设置通用导流片，保证气流能够平稳通过，进而使气流速度损失最小。

查阅相关资料，结合实地调研河北省保定市曲阳县河北绿阳现代农业园区（38°N，114° E）内的苹果园，苹果树行距为3.50 m。喷雾机工作最佳喷雾距离为1.25 m [22]，再通过农机农艺相结合，设计得到多风道喷雾机风道部分总体尺寸宽 1.00 m，高 2.00 m，利用 AIP（Autodesk Inventor Professional）三维软件进行建模，得到风道主体部分结构示意图，如图1所示。



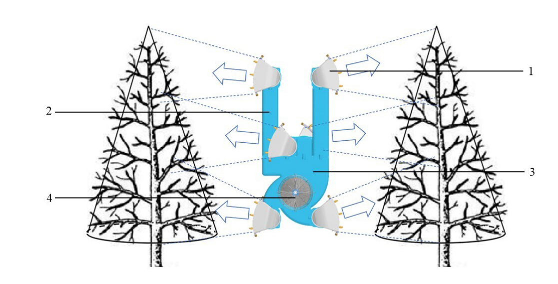
注：1. 出口1；2. 出口2；3. 出口3；4. 出口4；5. 出口5；6. 出口6；7. 导流板1；8. 导流板2；9. 导流板3

图1　多风道喷雾机六风道主体结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of main structure of six air ducts multi-air-sprayer

2.2 出风口设计

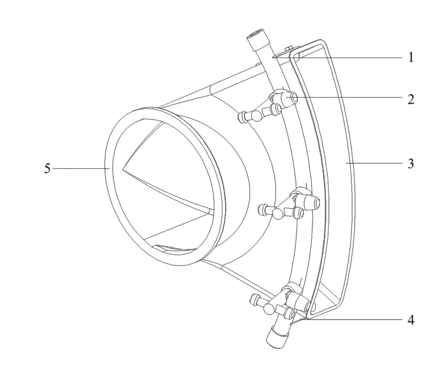
果园多风道喷雾机利用风机产生的高速气流对雾滴进行二次雾化，使得雾滴能够与靶标充分接触，故风机产生的气流应与雾滴充分接触。由于圆形风道出风为直线，无法产生射流扩散，根据图2所示的喷雾示意图，设计了一种鸭嘴型组合喷头出风口，出风口长度为360 mm，宽度为45 mm，扇面扩散角为55.0°，以实现气流在果树冠层上的全覆盖。该设计包括进风口、鸭嘴型出风口、喷管、喷头、固定片等组成，结构框图如图3所示。



注：1. 鸭嘴形喷雾装置；2. 延伸筒；3. 六出口风道；4. 风机

图2　多风道喷雾机喷雾示意图

Fig. 2 Schematic diagram of multi-air-sprayer spray



注：1. 喷管；2. 喷头；3. 鸭嘴型出风口；4. 固定片；5. 进风口

图3　鸭嘴型组合喷头出风口

Fig. 3 Outlet of duckbill type combined nozzle

在本设计中，由矩形截面的内部风道转为圆形截面的送风通道，再由圆形截面到鸭嘴型出风口的过程中，可以有效增大风压并扩大出风口的喷雾幅宽，使得喷头雾滴与鸭嘴型出风口的气流能够充分接触且气流分布均匀[23]，二次雾化效果明显，气流携带雾滴均匀喷洒到靶标区域，同时翻转叶片，使果树叶片正、反面均匀着药。

3　内部气流场模拟分析

3.1 影响因素分析

果园多风道风送式喷雾机中上层出风口内部风道由三块不同长度的导流板分割开，三块导流板能够调节离心风机产生的高速气流，实现对喷雾机内部送风系统气流场的分配，如图1所示。

离心风机产生的高速气流在喷雾机风道的导流作用下被定向输送至喷雾机各出风口，导流板的导向过程在很大程度上影响着喷雾机的作业效果。不同的导流板长度会影响着喷雾机内部气流的分布，产生不同的喷雾效果，同时影响着喷雾机的作业效率。

经分析，影响喷雾机内部气流的主要因素为三块导流板的长度，其中，导流板1的长度直接影响着出口3、出口4以及出口5的风速及风量，导流板2和导流板3则对出口3、出口4及出口5处的气流进行导向，如图1所示。为确定最佳组合，设置3因素3水平试验水平表，导流板长度需满足系统对风量的要求，试验因素下限由风量要求确定，该系统风量大小应满足3.61 m³/s。按照不同导流板规律依次递减，设计三块导流板长度初始长度分别为：导流板1的长度L_1为225.00 mm，导流板2的长度L_2为85.00 mm，导流板3的长度L_3为65.00 mm，如表1所示。使用Design-expert软件设计回归试验，试验方案表如表2所示。

表1　多风道喷雾机送风系统模拟试验的因素水平表

Table 1　Factor table of simulation test for air supply system of multi-air-duct sprayer

水平	试验因素		
	L_1/mm	L_2/mm	L_3/mm
1	225.00	85.00	65.00
0	200.00	60.00	50.00
−1	175.00	35.00	35.00

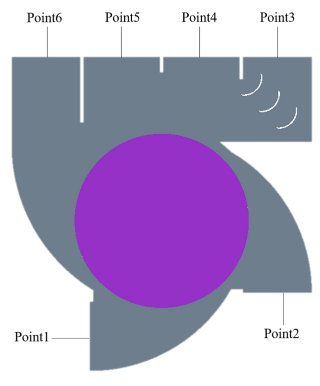
表2　试验方案设计表

Table 2　Test scheme design

试验序号	L_1/mm	L_2/mm	L_3/mm
1	175.00	35.00	35.00
2	200.00	60.00	35.00
3	225.00	35.00	50.00
4	175.00	60.00	35.00
5	200.00	60.00	50.00
6	225.00	60.00	35.00
7	175.00	60.00	65.00
8	200.00	85.00	35.00
9	225.00	60.00	65.00

3.2 模型建立与仿真试验

利用AIP软件对喷雾机模型进行初始建模，并按试验要求更改喷雾机导流板长度，将建好的13组流体域模型依次导入Star-CCM+软件中。在Star-CCM+软件中对模型进行表面修复、布尔运算、边界条件设定、物理模型定义、网格划分以及后处理分析，并监测6个出风口风速。多风道喷雾机流体域模型（图4）采用多面体网格，并对交界面和风机壁面进行局部加密处理。在模型设置完成后，在各个出风口处分别设置监测点（图4），并根据各监测点建立速度监测报告，得出各出风口处的平均气流风速计算结果，同时选取中间截面用以观察后处理中速度矢量分布图。



注：Point 1为监测点1，以此类推

图4　多风道喷雾机流体域模型各监测点分布图

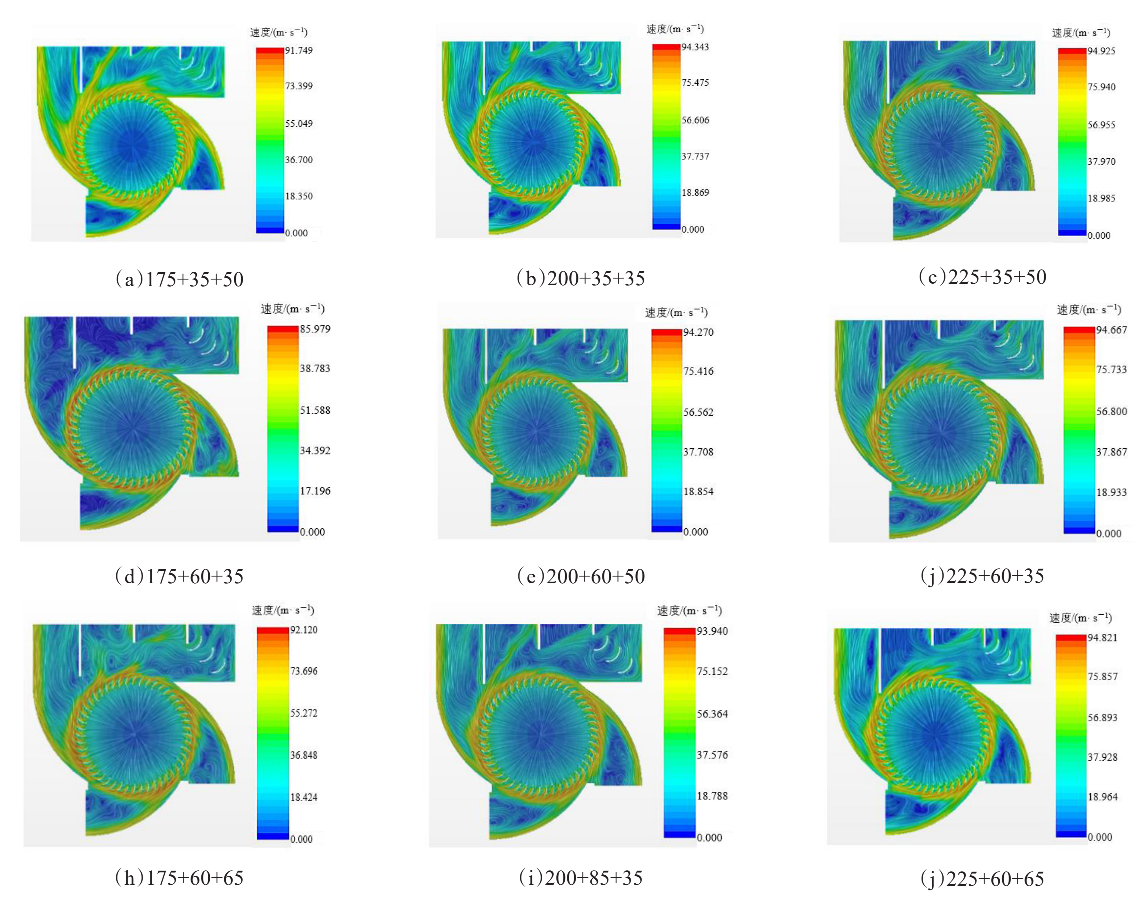
Fig. 4　Distribution charts of monitoring points for multi-air-duct sprayer fluid domain model

4　仿真结果与分析

4.1 基于Star-CCM+的内部流场仿真分析

模拟仿真结束后，将Star-CCM+软件中得到的各监测点的速度检测报告以及各模型截面的速度矢量图导出，如图5。将仿真计算的结果进行汇总并分析，图5中能明显看出风道内部气流变化情况。

整理汇总分析各监测点的速度监测报告，结果如图6。6组监测点按照1～6顺序，在不同导流板长度的速度标准差分别为0.7468、0.6776、



注：以导流板1+导流板2+导流板3作为参数组合编码规则，例如200+65+35表示导流板1长度为200.00 mm，导流板2长度为65.00 mm，导流板3长度为35.00 mm

图5 多风道喷雾机模型截面速度矢量分布图

Fig. 5 Velocity vector distribution of model section multi-air-duct sprayer

1.4441、5.1305、4.5768和0.8209。其中Point1、Point2、Point6这三个监测点的风速值标准差均小于1，表明导流板长度的变化对出风口1、出风口2、出风口6的速度变化影响较小可忽略不计，而Point3、Point4、Point5这三个监测点的风速值标准差较大，表明随着导流板长度的变化，出风口3、出风口4、出风口5处的风速受影响程度大。

4.2 结果分析与验证

为得到导流板长度最优参数组合，采用响应面法（Response Surface Methodology，RSM）对Point3、Point4、Point5这三个点的平均模拟风速值进行进一步研究，将三个点的风速响应值记为Y_3、Y_4、Y_5，影响因素导流板1的长度记为A、导流板2的长度记为B、导流板3的长度记为C，进行回归分析，得出回归方程。

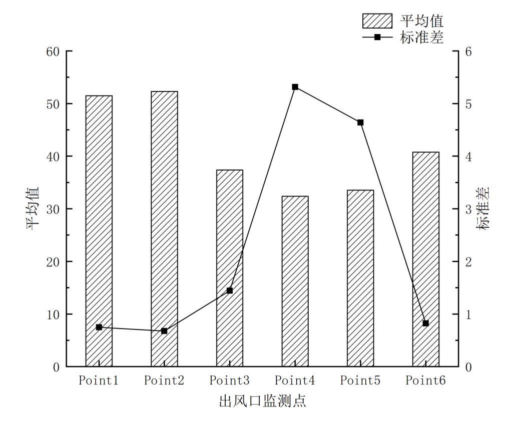


图6 喷雾机内部风道流体域模型风速计算结果

Fig. 6 Fluid velocity calculation results in internal duct of the sprayer

4.2.1　出风口3

对出风口3处的平均模拟风速值进行分析，得到回归方程如公式（2）。

$$Y_3=39.13-1.07\times A-0.13\times B-0.17\times C+0.13\times AB+0.19\times AC+0.16\times BC-1.84\times A^2-1.34\times B^2-0.58\times C^2 \quad (2)$$

回归方程的显著性及方差分析如表3所示。

模型 P 值<0.01，为极显著，决定系数 R^2=0.9979，表明模型拟合效果较好，可用来分析及预测响应值。该模型的一次项 A、B、C 极显著；3个因素之间两两交互 AC 极显著，AB、BC 显著；二次项 A^2、B^2、C^2 极显著。出风口3处的平均风速值 Y_3 作为评价标准，在数值分析中作为优化目标，期望 Y_3 最大化，约束是导流板1、导流板2、导流板3的长度，数学模型表示如公式（3）。

表3　多风道喷雾机出风口3平均风速值响应面回归方程的显著性及方差分析结果

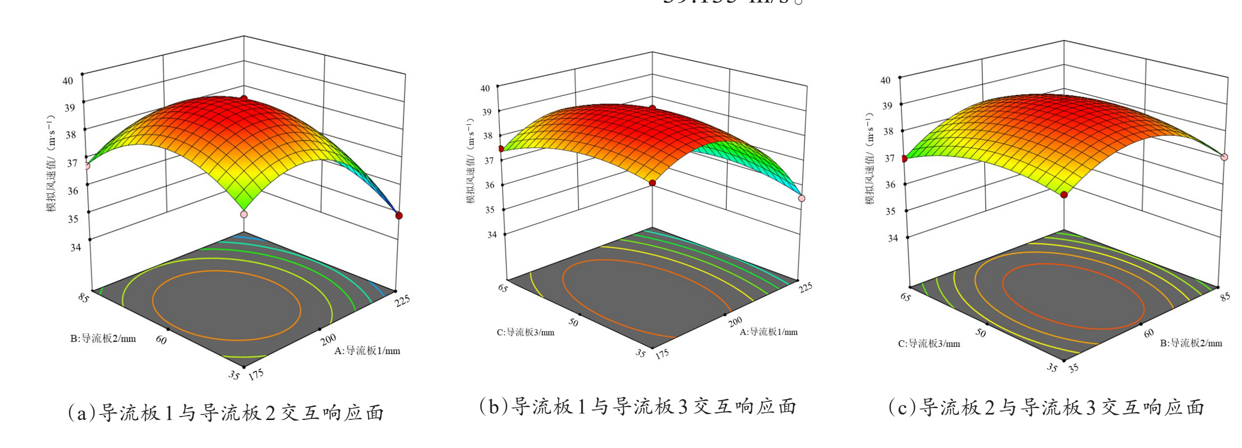
Table 3 Significance and variance analysis of response surface regression equation for outlet 3 of multi-air-duct sprayer

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	35.38	9	3.93	362.49	< 0.0001	显著
A-导流板1长度	9.24	1	9.24	851.81	< 0.0001	极显著
B-导流板2长度	0.13	1	0.13	12.36	0.0098	极显著
C-导流板3长度	0.24	1	0.24	22.53	0.0021	极显著
AB	0.067	1	0.07	6.11	0.0427	显著
AC	0.14	1	0.14	13.26	0.0083	极显著
BC	0.11	1	0.11	9.72	0.0169	显著
A^2	14.32	1	14.32	1320.81	< 0.0001	极显著
B^2	7.53	1	7.53	694.51	< 0.0001	极显著
C^2	1.42	1	1.42	131.36	< 0.0001	极显著
残差	0.08	7	0.01			
失拟项	0.08	3	0.03			
纯误差	0.00	4	0.00			
总离差	35.45	16				

$$\begin{cases} \max: Y_3=f(A,B,C) \\ \text{s.t.}\begin{cases} 175\leqslant A\leqslant 225 \\ 35\leqslant B\leqslant 85 \\ 35\leqslant C\leqslant 60 \end{cases} \end{cases} \quad (3)$$

为检验试验结果的可靠性，采用最优导流板参数组合进行3次平行仿真试验，得到的出风口3平均风速值分别为38.789、39.420和38.517 m/s，平均值为38.909 m/s，结果与预测值接近，相对误差为0.58%，表明该模型能够准确的预测仿真结果。

出风口3平均风速值的响应面结果如图7所示。由图7可以直观地发现导流板1、导流板2、导流板3之间的交互作用，两个因素同时作用下风速变化值明显，交互作用明显。分析出风口3处的平均风速值，在各试验因素的取值范围内，求得最优的导流板长度组合为导流板1长度200.00 mm、导流板2长度60.00 mm、导流板3长度50.00 mm，出风口3平均风速值为39.135 m/s。



（a）导流板1与导流板2交互响应面　（b）导流板1与导流板3交互响应面　（c）导流板2与导流板3交互响应面

图7　多风道喷雾机出风口3平均风速值的响应面

Fig.7 Response surface for average wind speed of outlet 3 of multi-air-duct sprayer

4.2.2 出风口4

对出风口4处的平均模拟风速值进行分析，得到回归方程如公式（4）。

$$Y_4 = 33.02 + 4.04 \times A - 4.37 \times B - 1.31 \times C - 2.24 \times AB + 3.78 \times AC + 1.72 \times BC + 3.10 \times A^2 - 2.21 \times B^2 - 2.28 \times C^2 \quad (4)$$

将回归方程的显著性及方差分析置于表4中。

由表4可知，模型 P 值<0.01，为极显著，决定系数 R^2=0.9704，表明模型拟合效果较好，可用来分析及预测响应值。该模型的一次项 A、B 极显著，C 显著；3个因素之间两两交互 AC 极显著，AB、BC 显著；二次项 A^2 极显著，B^2、C^2 显著。出风口4处的平均风速值 Y_4 作为评价标准，在数值分析中作为优化目标，期望 Y_4 最大化，约束是导流板1、导流板2、导流板3的长度，数学模型表示如公式（5）。

$$\begin{cases} \max: Y_4 = f(A, B, C) \\ s.t. \begin{cases} 175 \leqslant A \leqslant 225 \\ 35 \leqslant B \leqslant 85 \\ 35 \leqslant C \leqslant 60 \end{cases} \end{cases} \quad (5)$$

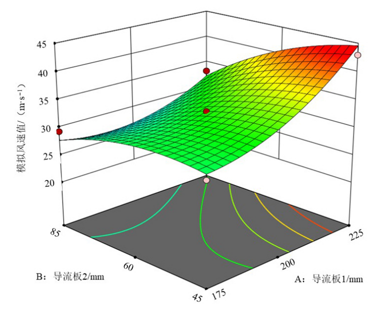
图8为出风口4平均风速值的响应面，可以直观地发现，导流板1、导流板2、导流板3之间的交互作用明显。分析出风口4处的平均风速值，在各试验因素的取值范围内，求得最优的导流板长度寸组合为导流板1长度223.72 mm、导流板2长度41.09 mm，导流板3长度50.21 mm，出风口4平均风速值为43.310 m/s。

表4 多风道喷雾机出风口4平均风速值响应面回归方程的显著性及方差分析结果

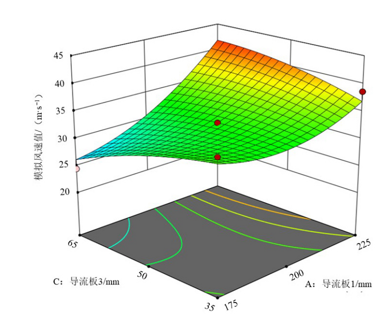
Table 4 Significance and variance analysis of response surface regression equation for outlet 4 of multi-air-duct sprayer

方差来源	平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
模型	465.72	9	51.75	25.54	0.0002	显著
A-导流板1长度	130.42	1	130.42	64.36	＜0.0001	极显著
B-导流板2长度	153.08	1	153.08	75.54	＜0.0001	极显著
C-导流板3长度	13.83	1	13.83	6.82	0.0348	显著
AB	20.09	1	20.09	9.91	0.0162	显著
AC	57.22	1	57.22	28.24	0.0011	极显著
BC	11.86	1	11.86	5.85	0.0461	显著
A^2	40.49	1	40.49	19.98	0.0029	极显著
B^2	20.51	1	20.51	10.12	0.0155	显著
C^2	21.92	1	21.92	10.82	0.0133	显著
残差	14.18	7	2.03			
失拟项	14.18	3	4.73			
纯误差	0.00	4	0.00			
总离差	479.90	16				

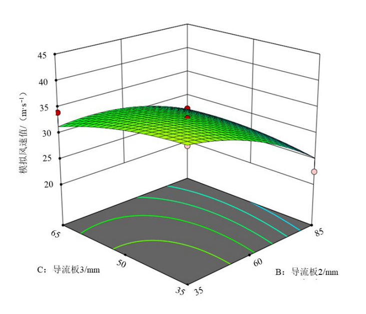
为检验试验结果的可靠性，采用最优导流板参数组合进行3次平行仿真试验，得到的出风口4平均风速值分别为43.215、43.269和43.478 m/s，平均值为43.321 m/s，结果与预测值接近，相对误差为0.02%，表明该模型能够准确的预测仿真结果。



(a)导流板1与导流板2交互响应面



(b)导流板1与导流板3交互响应面



(c)导流板2与导流板3交互响应面

图8 多风道喷雾机出风口4平均风速值的响应面

Fig. 8 Response surface for average wind speed of outlet 4 of multi-air-duct sprayer

4.2.3 出风口5

对出风口5处的平均模拟风速值进行分析，得到回归方程如公式（6）。

$$Y_5 = 34.33 - 4.71 \times A + 3.54 \times B - 0.87 \times C + 3.82 \times AB + 0.88 \times AC + 0.87 \times BC - 0.70 \times A^2 - 1.69 \times B^2 + 0.69 \times C^2 \quad (6)$$

将回归方程的显著性及方差分析结果列于表5中。

由表4可知，模型 P 值<0.01，为极显著，决定系数 R^2=0.9946，表明模型拟合效果较好，可用来分析及预测响应值。该模型的一次项 A、B、C 极显著；3个因素之间两两交互 AB 极显著，AC、BC 显著；二次项 B^2 极显著，A^2、C^2 显著。出风口5处的平均风速值 Y_5 作为评价标准，在数值分析中作为优化目标，期望 Y_5 最大化，约束是导流板1、导流板2、导流板3的长度，数学模型表示如公式（7）。

表5 多风道喷雾机出风口5平均风速值响应面回归方程的显著性及方差分析结果

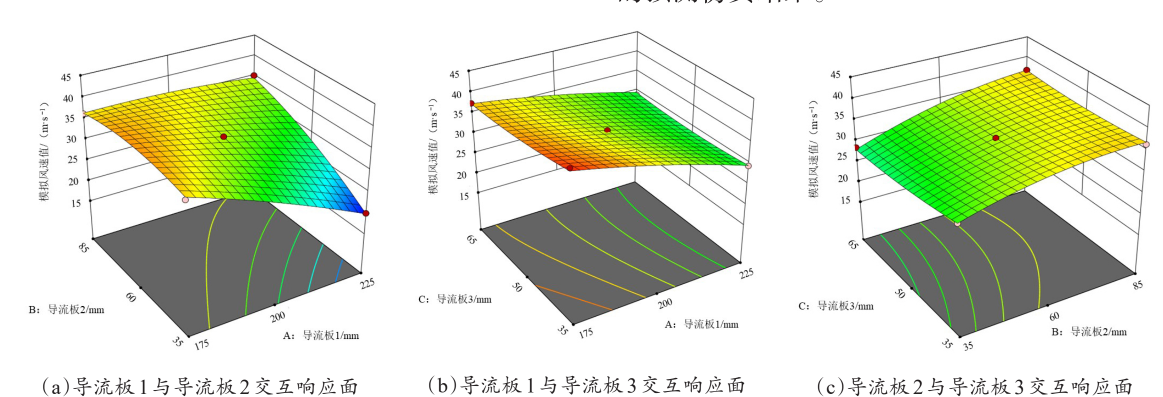
Table 5 Significance and variance analysis of response surface regression equation for outlet 5 of multi-air-duct sprayer

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	363.88	9	40.43	143.45	< 0.0001	显著
A-导流板1长度	177.14	1	177.14	628.50	< 0.0001	极显著
B-导流板2长度	100.46	1	100.46	356.43	< 0.0001	极显著
C-导流板3长度	6.00	1	6.00	21.28	0.0024	极显著
AB	58.26	1	58.26	206.70	< 0.0001	极显著
AC	3.09	1	3.09	10.96	0.0129	显著
BC	3.03	1	3.03	10.75	0.0135	显著
A^2	2.04	1	2.04	7.25	0.0310	显著
B^2	11.99	1	11.99	42.55	0.0003	极显著
C^2	1.99	1	1.99	7.06	0.0326	显著
残差	1.97	7	0.29			
失拟项	1.97	3	0.66			
纯误差	0.00	4	0.00			
总离差	365.85	16				

$$\begin{cases} \max: Y_5 = f(A, B, C) \\ \text{s.t.} \begin{cases} 175 \leqslant A \leqslant 225 \\ 35 \leqslant B \leqslant 85 \\ 35 \leqslant C \leqslant 60 \end{cases} \end{cases} \quad (7)$$

图9为出风口5平均风速值的响应面，可以直观地发现，导流板1、导流板2、导流板3之间存在交互作用，且交互作用明显。分析出风口5处的平均风速值，在各试验因素的取值范围内，求得最优的导流板长度长度组合为导流板1长度175.00 mm、导流板2长度51.53 mm、导流板3长度35.00 mm，出风口5平均风速值为40.963 m/s。

为检验试验结果的可靠性，采用最优导流板参数组合进行3次平行仿真试验，得到出风口5平均风速值为分别为40.129、41.246和41.875 m/s，平均值为41.083 m/s，结果与预测值接近，相对误差为0.29%，表明该模型能够准确的预测仿真结果。



（a）导流板1与导流板2交互响应面　（b）导流板1与导流板3交互响应面　（c）导流板2与导流板3交互响应面

图9 多风道喷雾机出风口5平均风速值的响应面

Fig. 9 Response surface for average wind speed of outlet 5 of multi-air-duct sprayer

4.2.4 综合分析

综上所述，由于出风口4与出风口5，出风口3与出风口6为左右对称出口，需满足对称位置出风均匀。为减少误差、确保以上数据处理符合要求。确保试验结果的准确性、可靠性，进行相对误差分析，通过计算以上三组参数组合对称

位置出风口风速的相对误差得出表6。由表6可知，确定导流板1长度200.00 mm、导流板2长度60.00 mm、导流板3长度50.00 mm为最优参数组合。

表6 多风道喷雾机对称出风口风速相对误差分析

Table 6 Relative error analysis of symmetrical outlet wind speed of multi-air-duct sprayer

组别	出风口3/m·s^{-1}	出风口6/m·s^{-1}	相对误差/%	出风口4/m·s^{-1}	出风口5/m·s^{-1}	相对误差/%
200+60+50	39.135	41.320	5.58	33.022	34.328	3.95
223.72+41.09+50.21	35.692	41.033	14.96	43.310	22.680	47.63
175+51.53+35	38.141	40.301	5.66	35.953	40.963	13.94

5 室内风速验证试验

5.1 试验方案

为更好地考察果园多风道喷雾机送风系统风场的分布情况，以仿真优化分析获得的喷雾参数组合作为试验条件，通过室内风速试验对送风系统的风场分布情况进行研究，同时验证仿真模拟优化结果的准确性。

试验仪器包括多风道喷雾机送风系统装置、风速测量仪（AS856S，希玛公司）、标杆、盒尺、三项异步电动机（Y2-90L-2极）和变频器（M2-2R2G3）等。将标杆距地面0.50 m处作为第一个监测点，以此为基点在标杆上方每隔0.30 m进行标记作为测量点，最高测量到3.50 m处。连接变频器与三项异步电动机，并把变频器与三项电源相接，将标杆置于喷雾机出风口轴线1.25 m处，打开电源，调节变频器频率由0逐渐增加到39 Hz，此时风机转速为2184 r/min，待风机转速稳定后打开风速测量仪，置于测量点处对风速进行测量，并进行记录。一侧测量完成后对另一侧按同样的测量方法进行风速检测，每侧风速分别做三次平行试验。

5.2 验证结果分析

记录整理喷雾机左右两侧采样得到的风速值，单侧平行试验后的风速值取其平均数，应用数据分析软件进行处理得到如图10的点线图。点线图中展现了在距离喷雾机出风口1.25 m处风场的分布情况，以高度为纵坐标可以发现在没有受到果树冠层干扰的情况下，风速由上层到下层逐渐增大，实现风场按果树冠层形状分布。依据戴奋奋[24]所述末速度原则，到达果树内膛的气流风速应达到9～10 m/s，在室内风速实验中上层平均风速为15.750 m/s，中层平均风速为20.830 m/s，下层平均风速为28.270 m/s，满足末速度原则，并且经试验验证喷雾机左右两侧风场分布均匀对称。

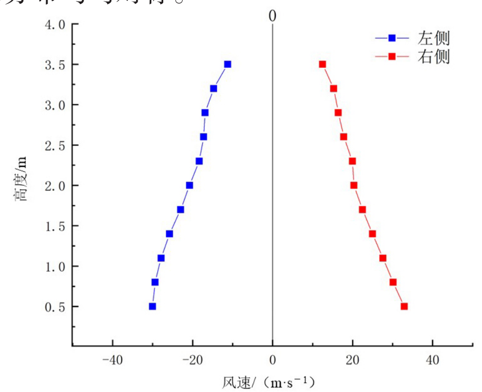


图10 室内风速试验风速分布示意图

Fig. 10 Wind speed distribution diagram of indoor wind speed test

6 结 论

本研究针对多风道喷雾机内部气流分布不均，导致由出风口吹出的气流紊乱，不能使雾滴在果树冠层上均匀沉积的问题，基于Star-CCM+软件对多风道喷雾机内部气流场进行仿真分析，确定导流板最优长度、组合，并进行了室内风速试验验证。

（1）应用CFD技术，基于Star-CCM+软件对果园多风道喷雾机送风系统内部气流进行模拟分析，得到出风口1～6的风速在不同导流板长度的标准差分别为0.7468、0.6776、1.4441、

5.1305、4.5768和0.8209。

（2）对风速标准差较大的出风口3～5进行响应面分析，最终确定导流板1长度200.00 mm、导流板2长度60.00 mm、导流板3长度50.00 mm为最优参数组合，得到对称出风口3和出风口6的风速值为39.135和41.320 m/s，相对偏差为5.58%，出风口4和出风口5的风速值为33.022和34.328 m/s，相对偏差为3.95%，最终结果符合设计要求。

（3）通过室内风速试验表明在距离喷雾机出风口1.25 m处风场风速由上层到下层逐渐增大，实现风场按果树冠层形状分布，并且经试验验证喷雾机左右两侧风场对称分布。

参考文献：

[1] 傅锡敏, 吕晓兰, 丁为民. 我国果园植保机械现状与技术需求[J]. 新疆农机化, 2011(1): 61-63.
FU X, LYU X, DING W. Current situation and technical demand of orchard plant protection machinery in China[J]. Xinjiang Agricultural Mechanization, 2011(1): 61-63.

[2] BADULES J, VIDAL M, BONÉ A, et al. Comparative study of CFD models of the air flow produced by an air-assisted sprayer adapted to the crop geometry[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 149: 166-174.

[3] 何雄奎. 中国精准施药技术和装备研究现状及发展建议[J]. 智慧农业(中英文), 2020, 2(1): 133-146.
HE X. Research progress and developmental recommendations on precision spraying technology and equipment in China[J]. Smart Agriculture, 2020, 2(1): 133-146.

[4] 张燕妮, 翟长远, 赵娟. 果园风场与雾场测量建模方法[J]. 农机化研究, 2020, 42(4): 264-268.
ZHANG Y, ZHAI C, ZHAO J. Modeling and measuring method of orchard airflow and droplet field[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(4): 264-268.

[5] PFEIFFER S A, GUEVARA J, CHEEIN F A, et al. Mechatronic terrestrial LiDAR for canopy porosity and crown surface estimation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 146: 104-113.

[6] GIL E, ARNO J, LLORENS J, et al. Advanced technologies for the improvement of spray application techniques in Spanish viticulture: An overview[J]. Sensors, 2014, 14(1): 691-708.

[7] PETROVIĆ D. Odnos selektivnog i konvencionalnog raspršivanja te njihov utjecaj na depozit i zanošenje tekućine[D]. Osijek: Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, 2018.

[8] GRELLA M, MARUCCO P, MANZONE M, et al. Effect of sprayer settings on spray drift during pesticide application in poplar plantations (*Populus spp.*)[J]. Science of the Total Environment, 2017, 578: 427-439.

[9] 康峰, 吴潇逸, 王亚雄, 等. 农药雾滴沉积特性研究进展与展望[J]. 农业工程学报, 2021, 37(20): 1-14.
KANG F, WU X, WANG Y, et al. Research progress and prospect of pesticide droplet deposition characteristics[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(20): 1-14.

[10] WU B, HUANG K, QING D, et al. Numerical simulation and optimization of perforated tube trolley in circular cooler[J]. World Journal of Engineering and Technology, 2017, 5(4): 684-695.

[11] 邱威, 丁为民, 汪小旵, 等. 3WZ-700型自走式果园风送定向喷雾机[J]. 农业机械学报, 2012, 43(4): 26-30, 44.
QIU W, DING W, WANG X, et al. 3WZ-700 self-propelled air-blowing orchard sprayer[J]. Transactions of the CSAM, 2012, 43(4): 26-30, 44.

[12] 周良富, 傅锡敏, 丁为民, 等. 组合圆盘式果园风送喷雾机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(10): 64-71.
ZHOU L, FU X, DING W, et al. Design and experiment of combined disc air-assisted orchard sprayer[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(10): 64-71.

[13] 陈帮. 离心风机进气箱导流板的优化设计[J]. 煤矿机械, 2022, 43(2):130-134.

[14] 丁天航, 曹曙明, 薛新宇, 等. 果园喷雾机单双风机风道气流场仿真与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(14): 62-68, 315.
DING T, CAO S, XUE X, et al. Simulation and experiment on single-channel and double-channel airflow field of orchard sprayer[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(14): 62-68, 315.

[15] ENDALEW A M, DEBAERB C, RUTTEN N, et al. A new integrated CFD modelling approach towards air-assisted orchard spraying—Part I: Model development and effect of wind speed and direction on sprayer airflow[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010, 71(1): 128-136.

[16] NUYTTENS D, ZWERTVAEGHER I K A, DEKEYSER D. Spray drift assessment of different application techniques using a drift test bench and comparison with other assessment methods[J]. Biosystems Engineering, 2017, 154: 14-24.

[17] BADULES J, VIDAL M, BONÉ A, et al. Comparative study of CFD models of the air flow produced by an air-assisted sprayer adapted to the crop geometry[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 149: 166-174.

[18] HONG S W, ZHAO L, ZHU H. CFD simulation of airflow in side tree canopies discharged from air-assisted

sprayers[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 149: 121-132.
[19] ZHENG Y, YANG S, LIU X, et al. The computational fluid dynamic modeling of downwash flow field for a six-rotor UAV[J]. Frontiers of Agricultural Science and Engineering, 2018, 5(2): 159-167.
[20] HOŁOWNICKI R, DORUCHOWSKI G, ŚWIECHOWSKI W, et al. Variable air assistance system for orchard sprayers: Concept, design and preliminary testing[J]. Biosystems Engineering, 2017, 163: 134-149.
[21] 翟长远, 张燕妮, 窦汉杰, 等. 果园风送喷雾机出风口风场CFD建模与试验[J]. 智慧农业(中英文)2021, 3(3): 70-81.
ZHAI C, ZHANG Y, DOU H, et al. CFD modeling and experiment of airflow at the air outlet of orchard air-assisted sprayer[J]. Smart Agriculture, 2021, 3(3): 70-81.
[22] 李建平, 边永亮, 杨欣, 等. 果园多风机风送喷雾机作业参数优化与试验[J]. 吉林大学学报(工学版), 2022, 52(10): 2474-2485.
LI J, BIAN Y, YANG X, et al. Operational parameter optimization and testing of an air-assisted multi-fan orchard sprayer[J]. Journal of Jilin University (Engineering Edition), 2022, 52(10): 2474-2485.
[23] 姜宗月. 果园定向仿形弥雾机的研制与试验[D]. 泰安: 山东农业大学, 2014.
JIANG Z. Development and experiment of directional profiling orchard mist sprayer[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2014.
[24] 戴奋奋. 风送喷雾机风量的选择与计算[J]. 植物保护, 2008(6): 124-127.
DAI F. Selection and calculation of the blowing rate of air-assisted sprayers[J]. Plant Protection, 2008(6): 124-127.

Design Optimization and Test of Air Supply System for Multi-Duct Sprayer

GUO Jiangpeng, WANG Pengfei*, LI Xinhao, YANG Xin, LI Jianping, BIAN Yongliang, XUE Chunlin

(*College of Mechanical and Electrical Engineering*, *Agricultural University of Hebei*, *Baoding* 071000, *China*)

Abstract: In view of the uneven distribution of airflow inside the multi-air-duct sprayer, the air flow caused by the air outlet is disturbed and the droplet can not be evenly deposited on the fruit tree canopy. In this research, the length parameter of the inner baffle plate of the multi-duct sprayer was optimized. The Computational Fluid Dynamics (CFD) was used to simulate and analyze the internal airflow of the air supply system of the multi-duct sprayer based on Star-CCM+ software. The standard deviations of the wind speed of the wind outlet 1~6 at different guide plates were 0.7468, 0.6776, 1.4441, 5.1305, 4.5768 and 0.8209, respectively. Among them, the standard deviations of wind speed value at Point 1, Point 2 and Point 6 were less than 1, indicating that the change of deflector length has little impact on the speed change. The standard deviations of wind speed value at Point 3, Point 4 and Point 5 were large, indicating that with the change of deflector length, the wind speed at Air outlet 3, Air outlet 4, Air outlet 5 were greatly affected. On this basis, through the response surface analysis of Air outlet 3, Air outlet 4 and Air outlet 5, it was determined that, the length of Deflector 1 as 200 mm, the length of Deflector 2 as 60 mm and the length of Deflector 3 as 50 mm, was the optimal parameter combination. Under the optimal combination parameters, the wind speed values of symmetrical Air outlet 3 and Air outlet 6 were 39.135 and 41.320 m/s, respectively, with a relative deviations of 5.58%. The wind speed values of air outlet 4 and air outlet 5 were 33.022 and 34.328 m/s, respectively, with a relative deviation of 3.95%, which meeting the design requirements of sprayer. The indoor wind speed test results showed that the average wind speed of the upper layer was 15.75 m/s, the average wind speed of the middle layer was 20.83 m/s, and the average wind speed of the lower layer was 28.27 m/s, which met the end speed principle. The wind field was distributed according to the shape of the fruit tree canopy. The wind field of the left and right sides of the sprayer was symmetrical distributed and the air distribution was uniform. The work can provide a reference for the design of multi-duct sprayer.

Key words: Computational Fluid Dynamics (CFD); multi-duct sprayer; air supply system; flow field simulation; response surface methodology; uniform deposition